水保监测与应用技术

基于温度植被旱情指数的徐州市郊干旱遥感监测

赵丽花[1,2], 杜培军[1,2], 逄云峰[3], 张华鹏[1,2]
(1. 中国矿业大学 测绘与空间信息工程研究所, 江苏 徐州 221116;
2. 国土环境与灾害监测国家测绘局重点实验室, 江苏 徐州 221116; 3. 龙口矿业集团生产处, 山东 龙口 265700)

摘 要: 利用 Landsat TM/ETM+ 数据,以徐州市郊为研究区,获取归一化植被指数(NDVI)、土壤调整植被指数(SAVI)和地表温度(Ts)信息,分别构建 NDVI—Ts 和 SAVI—Ts 特征空间,依据这两个特征空间计算出研究区 2001 年 4 月 3 日和 2007 年 5 月 14 日的温度植被旱情指数 TVDI(NDVI)和 TVDI(SAVI),并分别与地表温度(Ts)和降水量进行了相关评价。结果表明,TVDI 可用于实现大范围的干旱监测,SAVI 能够修正 NDVI 对土壤背景的敏感,基于 SAVI 的反演结果明显优于基于 NDVI 的反演结果,能够有效地运用于干旱监测。

关键词: 干旱监测; 归一化植被指数; 土壤调整植被指数; 地表温度; 温度植被旱情指数
文献标识码: B 文章编号: 1000-288X(2010)04-0110-05 中图分类号: TP79

Monitoring Drought Using Temperature/Vegetation Drought Index Based on Remote Sensing Images

ZHAO Li-hua[1,2], DU Pei-jun[1,2], PANG Yun-feng[3], ZHANG Hua-peng[1,2]
(1. *Institute of Surveying and Spatial Information Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu* 221116, *China*; 2. *Key Laboratory for Land Resources and Disaster Monitoring of the State Bureau of Surveying and Mapping (SBSM) of China, Xuzhou, Jiangsu* 221116, *China*; 3. *Department of Production, Longkou Mine Group, Longkou, Shangdong* 265700, *China*)

Abstract: Taking Xuzhou City as a study case, normalized difference vegetation index (NDVI), soil-adjusted vegetation index(SAVI), and land surface temperature(LST) are derived from Landsat TM/ETM+ remotely sensed data and then used to monitor drought status. The spatial characteristics of the vegetation indices and LST are built, by which the temperature vegetation dryness index (TVDI) is calculated from the remote sensing images obtained on April 3, 2001 and May 14, 2007. The analyses of TVDI, LST, and rainfall show that TVDI can be used to monitor drought largely and the result of TVDI based on SAVI is better than that based on NDVI.

Keywords: drought monitoring; NDVI; SAVI; LST; TVDI

干旱是我国主要的农业灾害之一,抗旱减灾是中国长期面临的一个问题。鉴于传统干旱监测的局限性和遥感技术的宏观、动态、客观、时效性等特点,利用遥感技术进行干旱监测已成为当前的研究热点[1]。目前,国内外采用遥感技术监测干旱的方法较多,主要集中于基于归一化植被指数(NDVI)和地表温度(Ts)的干旱监测。但由于归一化植被指数(NDVI)本身的缺陷,单独利用归一化植被指数(NDVI)作为旱情指标表现出一定的滞后性[2]。相比之下,基于地表温度(Ts)作为干旱指标的监测方法具有更高的时效性,但容易受到植被覆盖的影响,只适合于裸土或稀疏植被地区[3, 7]。

近年来,国内外学者尝试利用 NDVI 和地表温度(Ts)综合信息,即构建 NDVI 和地表温度(Ts)特征空间监测旱情。Price[4] 和 Carlson[5] 发现,当研究区域的植被覆盖度和土壤水分条件变化范围较大时,NDVI 和 Ts 的散点图呈三角形,而 Moran 等[6] 从理论上分析认为 NDVI 和 Ts 的散点图呈梯形关系。

收稿日期: 2009-12-30 修回日期: 2010-01-29
资助项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目"煤矿区土地覆盖变化与土特性演变的多目标遥感分析研究"(NCET-06-0476); 江苏省"333 工程"科研项目资助计划(2009-32)
作者简介: 赵丽花(1985—),女(汉族),河南省安阳市人,硕士研究生,主要从事遥感应用技术的研究。E-mail: king.hua.001@yeah.net。
通信作者: 杜培军(1975—),男(汉族),山西省五台县人,博士,教授,博士生导师,主要从事遥感信息工程、地理信息科学领域的教学与科研工作。E-mail: dupjrs@cumt.edu.cn。

Sandholt[3] 等利用简化的 NDVI—Ts 特征空间, 提出了温度植被旱情指数(TVDI) 估算土壤表层水分状况。Bikash Ranjan Parida 等[8] 应用温度植被旱情指数(TVDI) 监测印度和菲律宾部分地区的干旱情况, 并与当地的作物产量对比分析效果显著。姚春生[9] 利用温度植被旱情指数(TVDI) 反演了新疆地区的土壤湿度; 齐述华等[10] 应用温度植被旱情指数(TVDI) 进行了全国旱情监测; 冯蜀青等[1] 利用温度植被旱情指数(TVDI) 对青海省东部浅山农业区的旱情进行了动态监测。

由于以上成果都是建立在 NDVI—Ts 特征空间的基础上, 植被非完全覆盖时土壤背景影响较大, NDVI 不能完整地反映植被长势的实际状况, 从而影响干旱的监测结果。与之相比, 土壤调整植被指数(SAVI) 能解释背景的光学特征变化并修正 NDVI 对土壤背景的敏感[11], 李春强等认为基于 SAVI 的温度植被旱情指数更适合于监测冬小麦春季的旱情[12]。本研究使用土壤调整植被指数(SAVI) 来代替 NDVI, 建立 SAVI—Ts 特征空间监测徐州地区的旱情。

干旱是徐州市主要的灾害气象之一, 近几十年来徐州市干旱天气出现的频率及其强度都有所增加, 1999—2002 年期间阶段性的干旱都是有气象记录以来少见的特旱天气, 2007 年自 4 月以来苏北地区降水量偏少, 气温比常年高 1 ℃~ 3 ℃, 部分地区出现旱情。本研究利用遥感卫星资料, 采用土壤调整植被指数(SAVI) 计算温度植被旱情指数(TVDI) 实现对徐州地区的干旱监测, 并与基于归一化植被指数(NDVI) 的计算结果进行比较。最后利用地表温度(Ts) 和实际降水量评价监测效果。

1　方法与原理

1.1　温度植被旱情指数(TVDI)

Sandholt[3] 利用简化的 NDVI—Ts 特征空间提出了水分胁迫指标, 即温度植被旱情指数(Temperature-Vegetation Dryness Index, TVDI)。TVDI 由植被指数和地表温度计算得到, 其定义为:

$$TVDI = (T_s - T_{smin}) / (T_{smax} - T_{smin}) \quad (1)$$

式中: T_{smin} ——最小地表温度, 对应的是湿边; T_s ——任意像元的地表温度; $T_{smax} = a + b \times NDVI$ 为某一 NDVI 对应的最高温度, 即干边; a, b——干边拟合方程的系数。

在这一简化特征空间中, 将湿边(T_{smin}) 处理为与 NDVI 轴平行的直线, 干边(T_{smax}) 与 NDVI 成线性关系。但 Moran 等[6] 研究表明, 不同的植被覆盖度条件下, NDVI—Ts 特征空间的最低温度(T_{smin}) 也不尽相同。因此, 本研究在对 NDVI(或 SAVI) —Ts 特征空间简化的基础上, 对 T_{smax} 和 T_{smin} 同时进行线性拟合, 拟合的方程为:

$$T_{smax} = a_1 + b_1 \times NDVI(或SAVI) \quad (2)$$

$$T_{smin} = a_2 + b_2 \times NDVI(或SAVI) \quad (3)$$

这样可以由下式计算温度植被旱情指数:

$$TVDI = \frac{T_s - (a_2 + b_2 \times NDVI)}{(a_1 + b_1 \times NDVI) - (a_2 + b_2 \times NDVI)} \quad (4)$$

或

$$TVDI = \frac{T_s - (a_2 + b_2 \times SAVI)}{(a_1 + b_1 \times SAVI) - (a_2 + b_2 \times SAVI)} \quad (5)$$

式中: a_1, b_1 ——干边拟合方程的系数; a_2, b_2 ——湿边拟合方程的系数。在干边上 TVDI = 1, 湿边上 TVDI= 0。计算得到任一点 TVDI 值介于 0 和 1 之间。TVDI 越大, 土壤湿度越低, 干旱程度越严重; 反之干旱程度较轻。

TVDI 较好地改变了单纯基于植被指数或单纯基于陆面温度进行监测的不足, 有效地减小了植被覆盖度对干旱监测的影响, 提高了遥感旱情监测的准确性和实用性。

此方法要求研究区域的范围足够大, 地表覆盖从裸土变化到比较稠密的植被覆盖, 土壤表层含水量从萎蔫含水量变化到田间持水量。本研究区域中土地利用类型较丰富, 能够满足监测需求。

1.2　基于单窗算法的地表温度反演

本研究采用覃志豪等[13] 推导的单窗算法(mono-window algorithm) 计算地表温度。公式为:

$$T_s = \frac{a_6(1 - C_6 - D_6) + [b_6(1 - C_6 - D_6) + C_6 + D_6]T_6 - D_6 T_a}{C_6} \quad (6)$$

$$T_a = 16.011\,0 + 0.926\,21 T_0 \quad (7)$$

$$\tau_6 = 0.974\,290 - 0.080\,07 w \quad (8)$$

式中: T_s ——地表温度(K); $a_6 = -67.355\,35$, $b_6 = 0.458\,608$; C, D ——中间变量, $C_6 = \varepsilon\tau_6$, $D_5 = (1 - \tau_6)[1 + (1 - \varepsilon)\tau_6]$; ε——比辐射率; τ——大气透过率; T_6 ——行星亮度温度(K); T_a ——大气平均作用温度; T_0 ——近地面气温(K), 研究中取当日的平均温度; w ——大气水分含量。由徐州气象部门可知, 2001 年 4 月 3 日 $T_0 = 285.75$ K, $w = 0.219$ g/cm^2; 2007 年 5 月 14 日 $T_0 = 298.35$ K, $w = 0.325$ g/cm^2。因此只要知道 ε 就可以求算任何像元的实际地表温度。

ε的估算方法[14] 为: 首先对研究区进行监督分类, 将遥感影像分为水体、城镇和自然表面 3 种类型。

水体像元的比辐射率赋值为 0.995, 自然表面和城镇像元的比辐射率则分别根据公式(9—10)进行计算:

$$\varepsilon_{surface} = 0.962\,5 + 0.061\,4P_v - 0.004\,61P_v^2 \quad (9)$$

$$\varepsilon_{built} = 0.958\,9 + 0.086P_v - 0.067\,1P_v^2 \quad (10)$$

式中: $\varepsilon_{surface}$, ε_{built} ——自然表面像元和城镇像元的比辐射率; P_v ——植被覆盖度, 计算方法为: $P_v = (\frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s})^2$, 其中 $NDVI_v = 0.70$, $NDVI_s = 0.05$。且当像元的 NDVI 值大于 0.70 时, P_v 取值为 1; NDVI 值小于 0.05, P_v 取值为 0。

2 资料获取与处理

研究中采用徐州市 2001 年 4 月 3 日 Landsat ETM$^+$ 和 2007 年 5 月 14 日 Landsat TM 遥感影像进行干旱监测。从气象部门获取当天的平均温度和大气水含量。

2.1 数据预处理

利用 ENVI 软件首先对两幅遥感影像进行几何校正、配准, 匹配精度控制在 0.5 个象元内。根据徐州市郊矢量图裁剪出研究区范围。其次利用公式(11)对 TM 影像进行辐射定标, 把 DN 值转换为相应的表观辐射亮度。定标公式为:

$$L_\lambda = Gain \times DN + Off_{set} \quad (11)$$

式中: Gain, Off_{set} ——波段定标系数。徐涵秋已总结了 TM/ETM$^+$ 影像各波段的定标系数值[15]。

在假设地表为朗伯体的前提下, 利用 公式(12)求得 TM/ ETM$^+$ 第 3, 4 波段的表观反射率:

$$\rho = \frac{\pi L_\lambda d^2}{ES_{un\lambda}\cos\theta} \quad (12)$$

式中: L_λ ——表观辐射亮度; d ——日距离(天文单位); $ES_{un\lambda}$ ——太阳光谱在某波段内的平均辐射照度; θ ——太阳入射天顶角(天顶角为太阳高度角的余角)。从影像头文件中获得 2001 年太阳高度角为 52.909 750 8, 2007 年为 64.875 211 4。

2.2 归一化植被指数和土壤调节植被指数计算

利用前文得到的波段地表反射率 ρ 求取 NDVI 和 SAVI。

$$NDVI = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3} \quad (13)$$

$$SAVI = (\frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3 + L}) \times (1 + L) \quad (14)$$

式中: ρ_4, ρ_3 ——近红外与红波段的反射率; L ——土壤调节系数。对中等植被覆盖度区 L 一般接近于 0.5, 研究中统一按 0.5 计算。绿色植被在近红外波段的反射率要高于红光波段, 所以其 NDVI 和 SAVI 的取值均为正。

2.3 地表温度反演结果

利用单窗算法计算得到 2001 年 4 月 3 日和 2007 年 5 月 14 日的地表温度。

从反演结果可以看出, 2001 年徐州市中心(尤其是建筑和人口密集区)、南部裸地温度较高; 2007 年高温区向北方和南方进一步扩大, 主要位于在城市中心和南部裸荒地。徐州市区地表温度明显高于周边郊区, 存在城市热岛现象。地表温度的高低能够反映作物干旱缺水状况, 因此可以用温度评价温度植被旱情指数的监测效果。

3 结果分析

3.1 植被指数—温度特征空间

以 2007 年 5 月 14 日的遥感影像为例说明植被指数—温度特征空间的特征。NDVI(或 SAVI)为 X 坐标轴, Ts 为 Y 坐标轴做二维散点图可得到 NDVI(或 SAVI) —Ts 特征空间分布图, 并从中可以得出, NDVI—Ts 与 SAVI—Ts 特征空间都近似呈三角形形状, 且两者都表现出相同的分布特征: 当植被指数值(NDVI, SAVI)大于 0 时, 随着 NDVI 或 SAVI 值的增大, Ts 最大值逐渐减小, 最小值逐渐增大, Ts 最值和植被指数值之间近似呈线性关系, 据此可以确定特征空间的干湿边方程。

以 NDVI—Ts 特征空间为例说明干湿边方程的确定。由于植被覆盖过高时, NDVI 值呈现饱和状态, 对植被检测灵敏度下降, NDVI 更适用于植被发育中期或中等覆盖度(低—中等叶面积指数)的植被监测[6]。因此选择反应发育中期的植被指数值, 由于植被生长状况各不相同, NDVI 值选择较大的区间范围, 本研究选择 0.08< NDVI< 0.6 的像素进行干湿边方程的拟合。用 IDL 软件编程, 查找取相同 NDVI 值时的 Ts 最大值和最小值, 并进行线性拟合, 拟合结果均符合 NDVI—Ts 和 SAVI—Ts 特征空间的变化规律; 且各回归方程都通过 t 检验, 相关性显著(显著水平为 5%)。

比较各回归方程的相关系数可知, 2001 年 4 月处于作物生长初期, 植被覆盖适中, 基于 SAVI 的拟合效果略好于 NDVI, 优势不是很明显。但是 2007 年 5 月作物生长较茂盛, NDVI 值趋于饱和, 受土壤背景的影响较大, 使得 NDVI 和 Ts 最小值之间的相关关系明显降低。相反, SAVI—Ts 特征空间较稳定, SAVI 和 Ts 之间仍显著相关。

3.2 旱情等级分布

根据拟合的干湿边方程, 计算遥感影像各象元的 TVDI 值, 得到温度植被旱情指数图, 分别记为 TV-

DI(NDVI) 和 TVDI(SAVI)。以 TVDI 为分级指标[10], 将干旱分为: 湿润(0< TVDI< 0.2), 正常(0.2 < TVDI< 0.4), 轻旱(0.4< TVDI< 0.6), 干旱(0.6 < TVDI< 0.8), 重旱(0.8< TVDI< 1.0) 共 5 个等级, 得到徐州市 2001 年 4 月 3 日和 2007 年 5 月 14 日的旱情等级分布图(附图 9—10) (以 2007 年为例)。比较两幅图可以发现基于NDVI和SAVI计算的TVDI分布图基本上趋于一致。对两年的旱情等级分布进行统计(表 1—2)。比较后可知, 2001 年基于NDVI计算得到的轻旱和干旱地区的面积与基于SAVI计算得到的面积相差不大, 分别为 26.17%, 28.87%和 31.78%, 30.20%。但两种方法计算的重旱区域面积相差较大, 分别为 15.02%, 10.31%。2007 年也出现了相同的情况, 其原因在于 NDVI 受土壤背景的影响和对高植被区较低的灵敏度而造成的监测结果不准确。相反, SAVI 能够解释背景的光学特征变化并修正 NDVI 对土壤背景的敏感, 因此基于 SAVI 计算的温度植被旱情指数(TVDI) 更能反映实际的干旱情况。

表 **1**　**2001** 年 **4** 月 **3** 日温度植被旱情指数(**TVDI**) 等级分布统计表

干旱等级	像元数/(Npts)		所占百分比/%	
	TVDI(NDVI)	TVDI(SAVI)	TVDI(NDVI)	TVDI(SAVI)
湿润	122 478	126 051	15.77	16.23
正常	87 451	111 761	11.26	14.39
轻旱	203 251	224 221	26.17	28.87
干旱	246 821	234 550	31.78	30.20
重旱	116 654	80 073	15.02	10.31

表 **2**　**2007** 年 **5** 月 **14** 日温度植被旱情指数(**TVDI**) 等级分布统计表

干旱等级	像元数/(Npts)		所占百分比/%	
	TVDI(NDVI)	TVDI(SAVI)	TVDI(NDVI)	TVDI(SAVI)
湿润	102 083	102 602	13.14	13.21
正常	132 717	145 569	17.11	18.74
轻旱	182 223	189 258	23.46	24.37
干旱	282 125	274 198	36.32	35.30
重旱	77 424	65 031	9.97	8.38

3.3　Ts 评价 TVDI(NDVI) 和 TVDI(SAVI) 的差异

将反演的 2007 年地表温度 Ts 和两个温度植被旱情指数(TVDI) 等级分布图对比分析发现, 干旱和重旱区域大部分都位于在城市中心和周边的裸地, 对应的 Ts 较高; Ts 较低的周边郊区, 监测结果为正常未出现干旱; 湿润地区多为市中心和农田周围的湖泊、煤矿塌陷地及其周边地区。TVDI 监测结果显示从城市中心到郊区干旱程度逐渐降低, 也体现了徐州市的城市热岛现象, 与 Ts 监测效果基本一致。由公式(4—5) 可知, TVDI 和 Ts 呈正比例关系, TVDI 的值越大, 相应的 Ts 值越高, 干旱程度越严重。因此利用 2007 年 TVDI 和 Ts 的相关性大小来评价 TVDI(NDVI) 和 TVDI(SAVI) 的监测效果的差异性和精度。

在遥感图像上选取多个像元点, 要求点均匀分布在图像上。对应的提取出这些点的 Ts 值、TVDI(NDVI) 和 TVDI(SAVI) 值。分别以 TVDI(NDVI)、TVDI(SAVI) 为 X 轴, Ts 为 Y 轴做二者的散点图(图 1)。从图 1 中拟合方程可推算, Ts 每变化 1 ℃, 则 TVDI(NDVI) 变化 0.077, TVDI(SAVI) 变化 0.079, 说明二者的监测效果差异性不大; 且 TVDI(NDVI) 和 TVDI(SAVI) 与 Ts 都具有很高的相关性, 相关系数分别为 0.902 和 0.938, TVDI(SAVI) 与 Ts 的相关性略高, 进一步说明 TVDI(SAVI) 的监测效果要优于 TVDI(NDVI)。

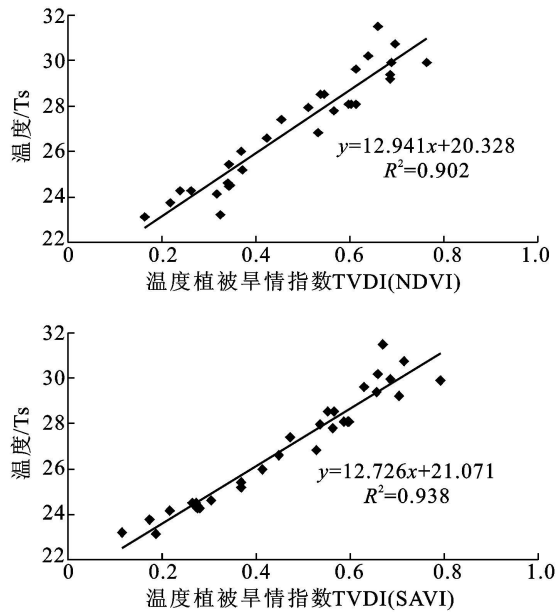


图 **1**　**2007** 年 **Ts** 和 **TVDI** 的关系

3.4　降水量数据验证干旱监测效果

采用中国科学院地理科学与资源研究所人地系统主题数据库(原中国自然资源数据库) 中 2001 年 4 月的 1 km^2 降水量数据库验证 TVDI(NDVI) 和 TVDI(SAVI) 干旱监测结果。根据徐州市矢量图从全国范围中裁剪出徐州市的降水量, 并对其进行标准化处理, 使降水量数值统一到 0 和 1 之间, 便于与 TVDI 比较分析(图 2)。

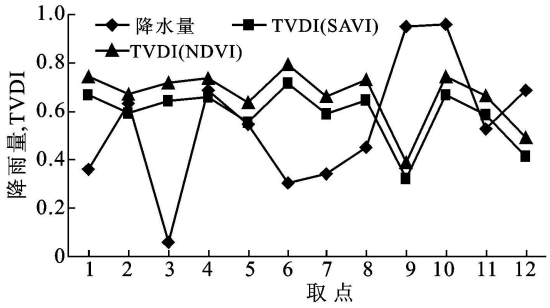


图 2 降水量与 **TVDI** 关系

从图 2 可知, 降水量与 TVDI 呈相反的变化趋势, 降水量少时, TVDI 值较大, 干旱程度较严重; 降水量多时, TVDI 值较小, 干旱程度较轻。因此, 利用 TVDI 能够实现大范围区域快速、准确及时的干旱监测。同时在图中可以看出, 无论降水量多少, TVDI(NDVI) 值较 TVDI(SAVI) 都偏大约 0.05, 即使在未发生干旱的区域, 由于受土壤较高背景的影响, 使得基于 NDVI 得到的 TVDI(NDVI) 值偏高造成监测结果不准确, 而 SAVI 在一定程度上能改善这一缺陷, 使其对土壤环境变化具有较高的灵敏性, 从而提高干旱监测的精度。

4 结 论

本研究分别基于 NDVI 和 SAVI 计算了温度植被旱情指数(TVDI)。结果表明, 基于 NDVI 计算的温度植被旱情指数 TVDI(NDVI) 和基于 SAVI 计算的温度植被旱情指数 TVDI(SAVI) 都可用于监测徐州地区 4 月和 5 月份的干旱状况, 二者反应的干旱趋势基本相同, 且利用温度(Ts)、降水量验正的监测效果较好。但 SAVI 能够修正 NDVI 对土壤背景的敏感, 使得基于 SAVI 的监测效果明显优于 NDVI。因此 SAVI—Ts 特征空间在一定程度上要比 NDVI—Ts 特征空间更能准确的反映干旱情况。但在计算 SAVI 时, 土壤调节系数 L 是经验固定值, 实际上它随植被覆盖度的变化而变化, 因此需要根据实际情况确定其值, 现在已经有了 MSAVI, TSAVI, SAVI2, SAVI3 等改进模型。为了进一步验证 SAVI 反演 TVDI 的监测效果, 可以结合实际的地面土壤相对湿度观测资料进行分析比较, 同时可以选取一年中不同时间的遥感影像加以分析, 实现徐州市干旱情况的动态监测, 有利于相关部门作出正确的决策。

在进行遥感旱情监测时, 旱情自身发展的不确定性、数据处理的不确定性以及不同遥感干旱指标在时空上的适应性问题直接影响到遥感监测的精度。因此, 为了提高监测效果需要对这些不确定因素进行探讨分析, 找出适合徐州地区不同时间的最佳干旱指数, 这也有待于今后进一步的深入工作。

[参 考 文 献]

[1] 冯蜀青, 殷青军, 肖建设, 等. 基于温度植被旱情指数的青海高寒区干旱遥感动态监测研究[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(5): 141-145.

[2] 王鹏新, 龚健雅, 李小文. 条件植被温度指数及其在干旱监测中的应用[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2001, 26(5): 412-418.

[3] Sandholt iv, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/ vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2): 213-224.

[4] Price J C. Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration [J]. IEEE Transactions on Geoseience and Remote Sensing, 1990, 28(5): 940-948.

[5] Carlson T N, Gillies R R, Schmugge T J. An interpretation of methodologies for indirect measurement of soil water content [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 77(3/4): 191-205.

[6] Moran M S, Clarke T R, Inoue Y, et al. Estimation crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 49(3): 246-263.

[7] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J, et al. Canopy temperature as a crop water stress indicator[J]. Water Resources Research, 1981, 17(4): 1133-1138.

[8] Bikash R P, Bakimchandra O. Drought monitoring in India and the Philippines with satellite remote sensing measurements[J]. EARSeL eProceedings, 2008, 7(1): 81-91.

[9] 姚春生, 张增祥, 汪潇. 使用温度植被干旱指数法(TVDI)反演新疆土壤湿度[J]. 遥感技术与应用, 2004, 19(6): 473-478.

[10] 齐述华, 王长耀, 牛铮. 利用温度植被旱情指数(TVDI)进行全国旱情监测研究[J]. 遥感学报, 2003, 7(5): 420-427.

[11] 赵英时等. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 377-378.

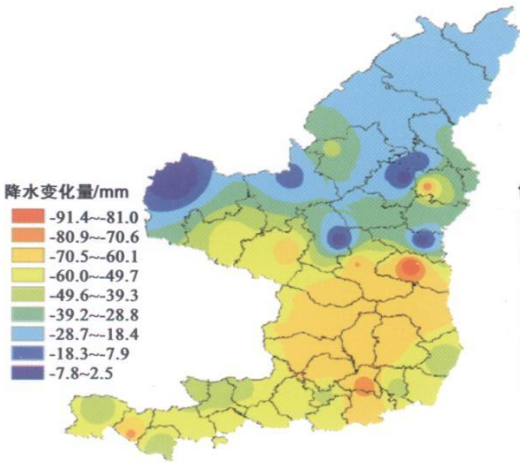
[12] 李春强, 李红军. TVDI 在冬小麦春季干旱监测中的应用[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(2): 161-165.

[13] 覃志豪, LI Wenjuan, ZHANG Minghua, 等. 单窗算法的大气参数估计方法[J]. 国土资源遥感, 2003, 2(56): 37-43.

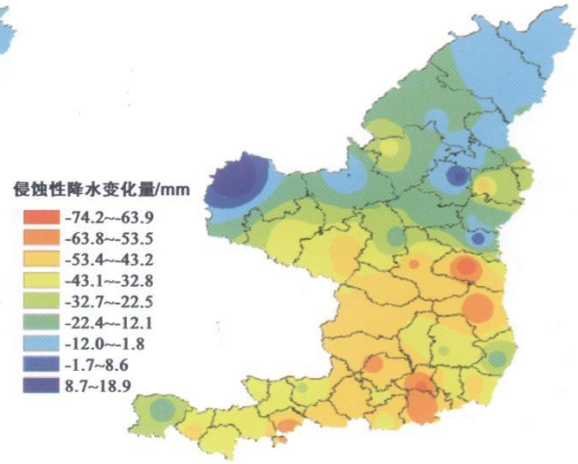
[14] 丁凤, 徐涵秋. 基于 Landsat TM 的 3 种地表温度反演算法比较分析[J]. 福建师范大学学报, 2008, 24(1): 91-96.

[15] 徐涵秋. 基于影像的 Landsat TM/ETM$^+$ 数据正规化技术[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2007, 32(1): 62-66.

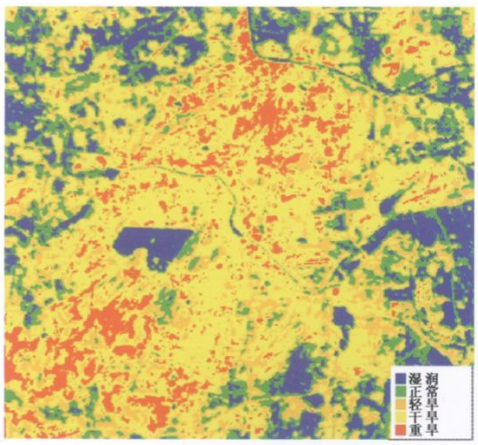
[16] 张智韬, 李援农, 杨江涛, 等. 遥感监测土壤含水率模型及精度分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 152-156.



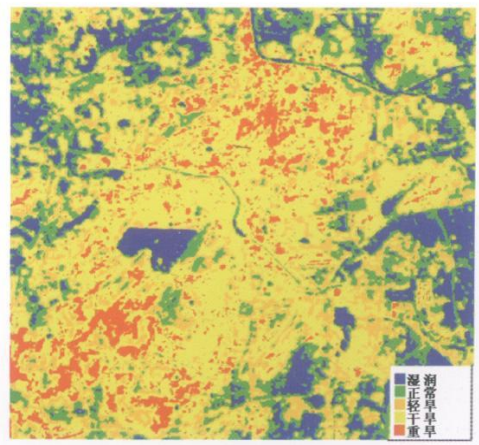
附图7　陕西省黄土高原地区年降水变化特征



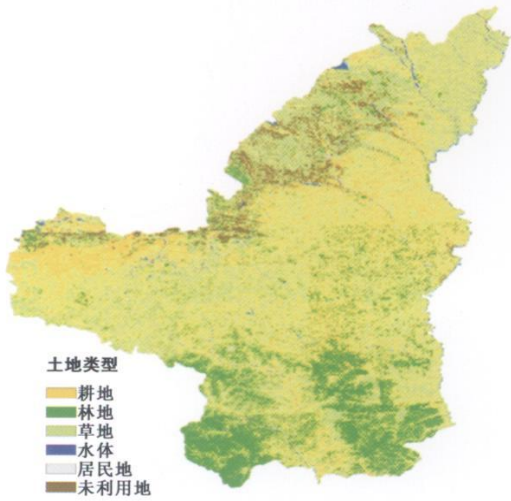
附图8　陕西省黄土高原地区侵蚀性降水变化特征



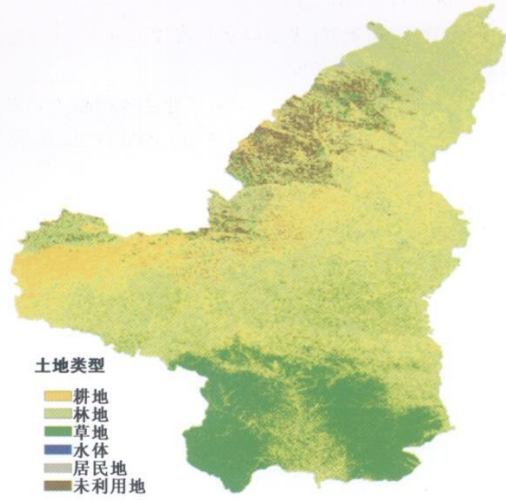
附图9　徐州市2007年5月14日TVDI(NDVI)分级



附图10　徐州市2007年5月14日TVDI(SAVI)分级



附图11　1997年陕北黄土区土地利用图



附图12　2006年陕北黄土区土地利用图